

В.В.Покотилов

КОМПЛЕКСНОЕ ТЕПЛОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭНЕРГОАКТИВНЫХ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

Белорусская государственная политехническая академия

Энергосбережение жилого дома формируется под воздействием цикла годовых внешних и внутренних тепловых возмущений и зависит от типа запроектированных теплопотребляющих систем и качества автоматизации.

В существующих методах проектирования эффект энергосбережения равнозначен снижению "установочной" тепловой мощности системы отопления. Тепловая мощность системы принимается равной сумме "расчётных потерь теплоты", в основном - через ограждения и на нагревание вентиляционного воздуха. Теплопотери рассчитываются в единицах мощности, исходя из нормируемого экстремального значения температуры наружного воздуха.

Реальная оценка энергосберегающего эффекта возможна только при анализе годового теплопотребления здания, однако существующие нормы не обязывают указывать данное значение в проектных показателях. Годовое (сезонное) теплопотребление жилого дома оценивают, как правило, величиной, прямо пропорциональной "расчётным потерям теплоты" с коэффициентом пропорциональности в виде "градусо-суток отопительного периода". Ввиду своей простоты данный метод широко распространён, но он неприемлем для энергоактивных зданий (ЭАЗ), в основу проектирования которых положены принципы "солнечной архитектуры" как для самого здания, так и для квартальной застройки. ЭАЗ отличается комплексной автоматизацией всех его инженерных систем, в результате чего в течение года на теплоснабжение дома реально и эффективно используется энергия внутренних тепловыделений, солнечная энергия, а также утилизируемая энергия удаляемого воздуха и канализационных вод. При этом утилизируемая энергия в оптимальной пропорции может взаимно перераспределяться между отопительными, вентиляционными и водоснабжающими системами /1/. Оптимальный теплогидравлический режим работы систем ЭАЗ обеспечивается за счёт комплексной наладки режимов работы звеньев каждой системы /2/.

Комплексный метод теплового проектирования предусматривает проведение гелиотермического анализа климата места застройки, создание энергоактивных и энергоэффективных фасадов, а также проектирование систем (микроклимата, гелиосистем и устройств утилизации тепловых сбросов) жилых зданий на основании балансов тепловых потоков и месячных энергетических балансов по составляющим энергозатрат.

1. Гелиотермический анализ климата места застройки

Гелиотермический анализ необходим для выявления энергоэффективных вариантов градостроительной структуры /3/. На основании статистических климатических данных /4/ вычисляются значения $k_{ст}$ в виде отношения суммарной за отопительный сезон радиации на вертикальную поверхность при азимутах $a_{ст i}$ к суммарной за отопительный сезон радиации при $a_{ст i} = 0$ (рис.1а). В представленном примере по результатам расчёта отмечается в летний период перегрев восточного

фасада на 18% и западного на 12% по сравнению с южным фасадом. В зимний период поступление суммарной солнечной энергии на восточный фасад на 60% меньше относительно южного фасада, а на западный - на 45%. Указанные обстоятельства обуславливают принципиальные отличия в формировании архитектурно-строительных решений каждого фасада ЭАЗ. Для зимнего периода гелиотермическая ось имеет отклонение от меридиана на $+3,3^\circ$. Таким образом, максимальной активностью к восприятию солнечной энергии обладает фасад с азимутом $+3,3^\circ$. При иной ориентации фасада происходит снижение поступающей солнечной энергии, однако снижение до 5% соответствует пределам погрешности исходных климатических данных, следовательно диапазон азимутов посадки на местности здания широтной ориентации можно ограничить пределами $a_{стi} \in -24...+32^\circ$. Планировочное решение жилой застройки предлагается составлять из ячеек дальнего порядка, в каждой из которых все дома являются энергоактивными (рис.1б).

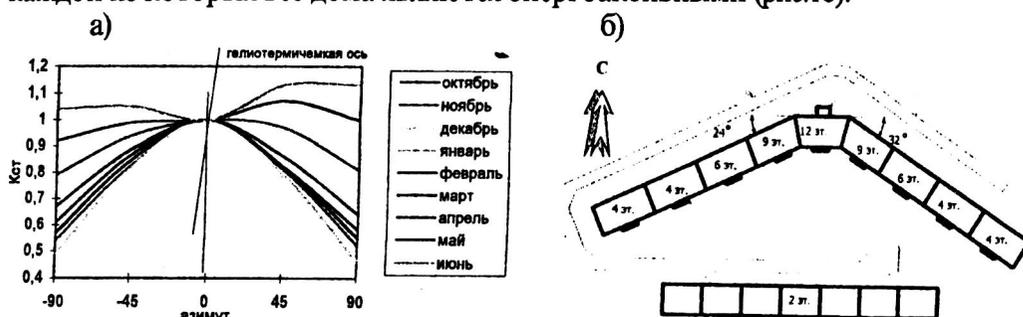


Рис. 1. Зависимость $K_{ст}$ от азимута стены $a_{ст}$ для г.Минска (а), энергоэффективная ячейка квартальной жилой застройки (б)

Ячейка формируется в виде треугольника, боковые грани которого находятся под углом 32° и 24° относительно основания, вдоль которого предусматриваются одно-двухэтажные дома. На боковых сторонах ячейки располагаются многоэтажные дома с увеличением этажности к вершине ячейки.

2. Энергоэкономичное проектирование гелиотехнических систем

Для условий Беларуси существующие гелиотехнические решения [5-7] в настоящее время в большинстве случаев экономически не привлекательны [1,8].

Для отопления в развитых странах с климатом, подобным Беларуси, в основном применяют "пассивные" способы использования солнечной энергии, в том числе с помощью окон, форма которых и местоположение на южном фасаде дома способствуют облучению только поверхности пола, который аккумулирует теплоту солнечного излучения. Поверхность пола должна иметь высокий показатель тепловой активности при наличии теплоёмкой бетонной подготовки толщиной около 0,2м. Из-за неприемлемости подобного решения в наших условиях предлагается в качестве теплоаккумулирующих поверхностей использовать широкие подоконники (из бетона, камня), стены и потолки (рис.2).

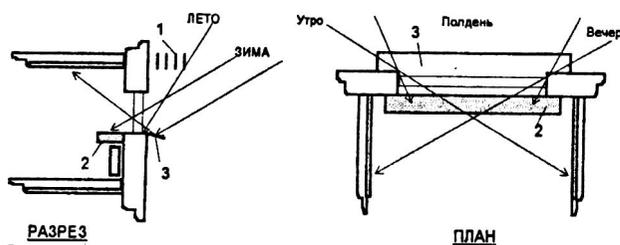


Рис.2. Конструкция окон южного фасада (деревянные полы в комнате): 1 - солнцезащитное устройство, 2 - бетонный подоконник, 3 - отражатель

Суммарные тепlopоступления от солнечной энергии за каждый месяц отопительного периода через окна южного фасада здания:

$$Q_{cmi} = Q_{cti} \cdot \eta_2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_{z1} \cdot A_o . \quad (1)$$

Для горячего водоснабжения в настоящее время применяют насосные гелиосистемы с расположением гелиоколлекторов на наружной поверхности дома (на кровле или на стене). Удельная стоимость такой гелиосистемы не менее 400 дол. США относительно 1 м² гелиоколлектора. В основном они имеют электронную систему управления насосом в двухпозиционном режиме регулирования, что приводит к снижению энергоэффективности по сравнению с проектными значениями /8,11/.

Предлагается комбинированная гелиосистема (рис. 3).

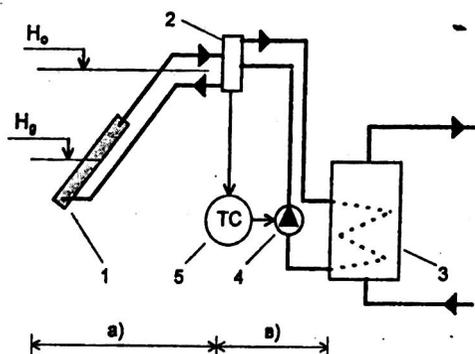


Рис. 3. Комбинированная гелиосистема: а – контур гравитационной циркуляции, в – контур насосной циркуляции. 1 - гелиоколлектор, 2 – смесительный бак (5... 20 литров), 3 – водяной аккумулятор (500 литров или более), 4 - насос, 5 - регулятор

С помощью метода размерностей для гравитационной гелиосистемы была получена и экспериментально подтвердилась зависимость (с безразмерным комплексом В) /8,9/:

$$\eta = a \cdot B^n , \quad \text{где } B = (\Delta T_m g h^{1,5}) / (\Delta T_a (S A^2 G_k v)^{0,5}). \quad (2)$$

Кроме того, экспериментально было доказано /9/, что в системах с гравитационной циркуляцией температура T''_m является функцией

$$T''_m = T_a + b [(T''_m - T_a) G_k h]^d . \quad (3)$$

Комплексная зависимость (2) следует физической сути процесса теплопереноса в гравитационной гелиосистеме. Она указывает на тесную связь тепловой эффективности с гидравлическими и геометрическими характеристиками гелиосистемы, а не только с климатическими параметрами и видом гелиоколлектора, как это принято сейчас. Функция (3) показывает, что температура T''_m теплоносителя на выходе не зависит от КПД η коллектора и гидравлических характеристик гелиосистемы. Это означает, что T''_m может быть рассчитана на стадии проектирования, а гелиосистема будет работать как саморегулирующаяся, поддерживающая максимальное значение T''_m , чего не может обеспечить автоматическое регулирование.

Расчёт выполняется в последовательности:

- для исходных условий наиболее “активного” месяца, например июля, при заданных геометрических характеристиках по формуле (3) вычисляется значение T''_m , с использованием которого по выражению (2) определяется S;
- по полученным температурным параметрам определяется циркуляционное

гравитационное давление и на основании S вычисляется максимальный расход теплоносителя M_{\max} , что позволяет выполнить гидравлический расчёт системы; - для каждого месяца года на основании расчётных гидравлических и геометрических характеристик по выражению (2) определяется η , а затем количество полученной тепловой энергии $Q_{US\ mi}$.

Предлагается размещать солнечный коллектор внутри неотапливаемого объёма (зимнего сада, атриума или теплицы), температура в котором в зимний и переходный периоды на $10-15^{\circ}\text{C}$ выше температуры наружного воздуха. При этом тепловая эффективность гелиоколлектора увеличивается почти в 2 раза по сравнению с его традиционным расположением на крыше здания. Данный вывод получен из выражения (2) на основе анализа исходных климатических данных /4/. Эта идея удачно реализуется для индивидуальных или блокированных ЭАЗ (рис.4).

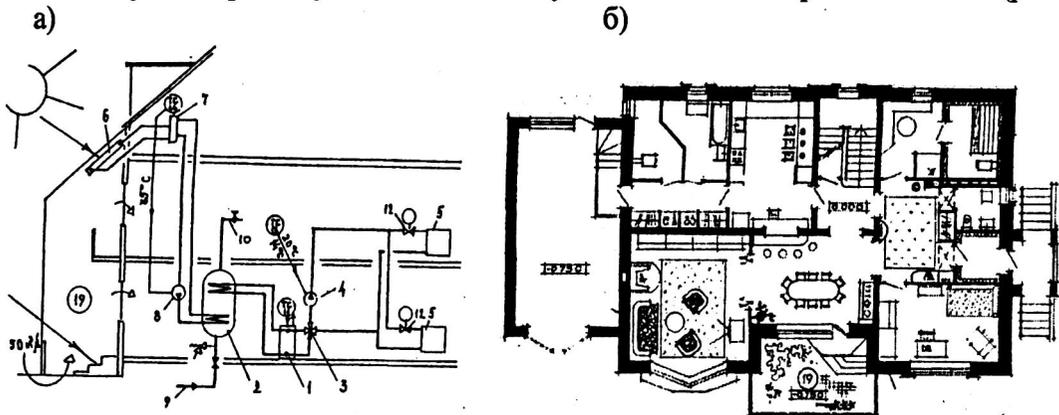


Рис.4.Схема теплоснабжения индивидуального жилого дома(а), план 1-го этажа - архитектор Н.Долгих(б); 1-котёл, 2-бак-аккумулятор с двумя теплообменниками, 3-клапан смешения, 4-насос отопления, 5-радиатор, 6-гелиоколлектор, 7-бак смешения, 8-насос гелиосистемы. 19 – зимний сад с солнечным коллектором в верхней зоне

В жилом доме (рис.4б), запроектированном по принципам “солнечной” архитектуры, отсутствует остекление восточного и западного фасадов, имеется минимальная остеклённость северного фасада, а стена южного фасада оборудована энергоактивными окнами (см.рис.2). Стоимость гелиосистемы не более 100дол.США относительно 1m^2 гелиоколлектора при увеличении среднегодовой тепловой эффективности почти в 2 раза по сравнению с существующими аналогами.

3.Расчёт тепловой мощности системы отопления

Тепловую мощность системы отопления здания предлагается определять с учётом способа регулирования

$$Q_{\text{от}} = Q_{\text{т}} + Q_{\text{н}} - Q_{\text{б}} \cdot (1 - \eta_1), \quad (4)$$

устанавливая таким образом зависимость мощности системы отопления от качества её автоматизации. Значение η_1 заимствовано из /10/ ($\eta_1=0,80$ при индивидуальном регулировании, $\eta_1=0,4$ при местном регулировании, $\eta_1=0,2$ без регулирования). В /10/ величина η_1 используется при оценке годовых расходов энергии на отопление здания.

4. Годовой энергетический баланс здания

Годовой баланс определяется суммой помесячных энергетических балансов по составляющим энергозатрат.

Суммарное потребление теплоты на теплоснабжение ЭАЗ по каждому месяцу Q_{mi} , МДж, предлагается определять по выражению

$$Q_{mi} = 2,6 [(Q_T + Q_H) \cdot (t_B - t_{mi}) / (t_B - t_H) - Q_B \cdot \eta_1] - Q_{с.ми} \cdot \eta_1. \quad (5)$$

Величина Q_B включает кроме бытовых теплопоступлений утилизируемую энергию тепловых сбросов.

Чтобы практически реализовать расчётный тепловой баланс ЭАЗ, необходим комплексный подход к проектированию инженерных систем как составляющих элементов единого архитектурно-энергетического комплекса здания. В зарубежной практике, как правило, для ЭАЗ применяют дорогостоящие системы управления, требующие соответствующей квалификации при обслуживании. Для условий Беларуси, особенно при проектировании многоквартирных ЭАЗ массовой застройки, требуются иные решения.

На рис.5 в качестве примера представлена принципиальная комплексная схема инженерных систем и средств автоматизации многоквартирного ЭАЗ /1/.

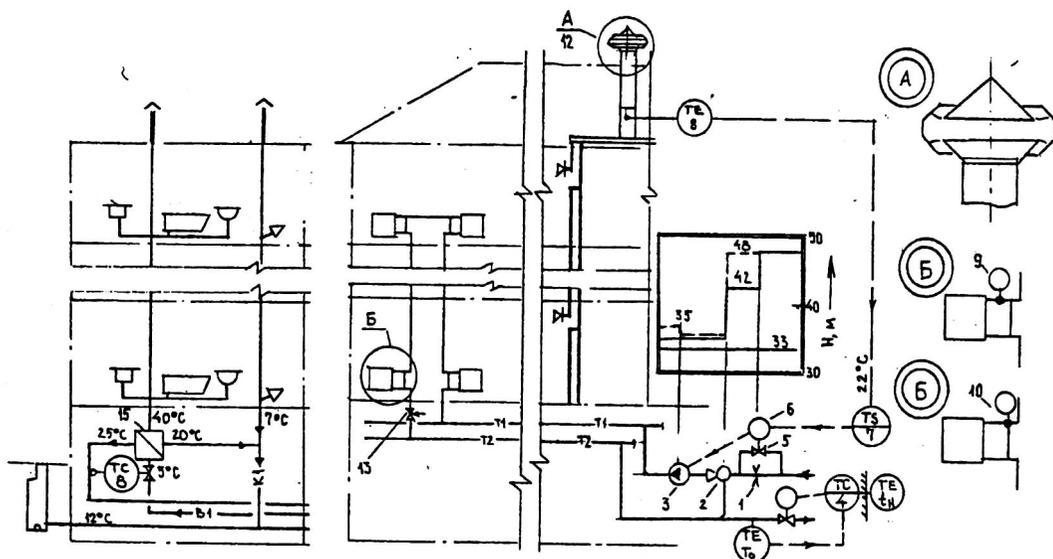


Рис.5.Схема комплексного энергоэффективного решения инженерных систем многоквартирного ЭАЗ. 1-диафрагма, 2-эlevator, 3-циркуляционный насос, 4-регулятор, 5,6 -двухпозиционный клапан, 7 -регулятор ET, 8 - датчик температуры, 9 -термостат для однотрубных систем, 10 -трёхходовой термостат , 11 -вентшахта, 12 -дефлектор, 13 -балансировочный вентиль. 15- теплообменник-утилизатор

ЭАЗ имеет солнцезащищённые окна восточного и западного фасадов и энергоактивную конструкцию окон южного фасада (см. рис.2). Окна жилых комнат являются "вентилируемыми" (приточным воздухом), что повышает эффективное сопротивление теплопередаче до $0,82 \text{ м}^2 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$ и при этом увеличивается температура поступающего в помещение наружного воздуха,

обеспечивая непрерывную и регулируемую пользователем подачу воздуха в жилые помещения. Энергоэффективность повышается при остеклении лоджий с теплоёмкими элементами.

Для удаления воздуха использован аэродинамически эффективный вид дефлектора. Оборудование теплового узла рассчитывается на "переключение" мощности системы отопления примерно на $\pm 30\%$ относительно расчётного значения. При возможном отказе автоматики (при временном отключении электроэнергии) тепловой узел будет работать в обычном режиме.

Частичная утилизация теплоты канализационных стоков от ванн, умывальников и моек осуществляется в рекуператоре 15 с понижением температуры от 40°C до $15...20^{\circ}\text{C}$ за счёт нагревания воды горячего водоснабжения от 5 до 25°C .

Удельное годовое теплопотребление на отопление, вентиляцию и горячее водоснабжение ЭАЗ, приведенное к 1 м^2 площади, составит $110 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$, в том числе на отопление и вентиляцию $53 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$.

На рис.6 показан пример ЭАЗ, рабочий проект которого выполнен ТМ арх.А.Соболевского по заказу Международной организации КАЯ.

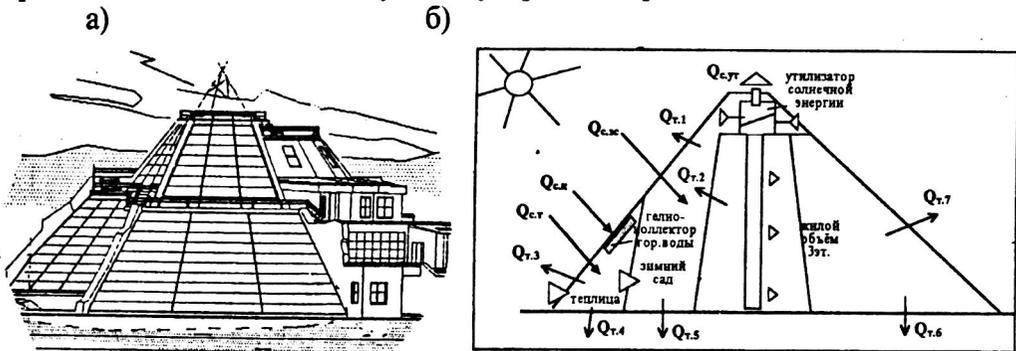


Рис.6.Общий вид многоквартирного жилого дома для детей-сирот в Минском районе (а), расчётная схема теплового баланса (б)

Общая площадь остекления теплицы и зимнего сада южного фасада равна 270 м^2 , площадь отапливаемых помещений - 830 м^2 . При проектировании были рассчитаны температуры в неотапливаемых объёмах теплицы и зимнего сада (рис.7а) и определены месячные тепловые балансы (рис.7б).

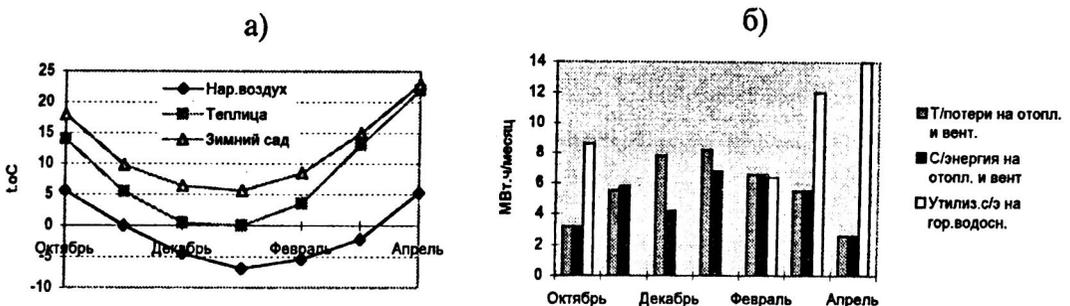


Рис.7.Результаты расчёта температур в неотапливаемых объёмах (а), результаты расчёта теплового баланса по месяцам отопительного периода (б)

В данном случае применялось воздушное отопление с доводчиками, механическая вентиляция с утилизацией теплоты удаляемого воздуха для подогревания воды горячего водоснабжения. Удельное годовое теплопотребление

на отопление, вентиляцию и горячее водоснабжение, приведенное к 1 м² площади, составляет 18 кВт·ч/м², в том числе на отопление и вентиляцию 9 кВт·ч/м². При рациональной эксплуатации, особенно при экономном расходовании воды в зимний период, можно отказаться от дополнительного использования топлива.

5. Наладка теплотребляющих инженерных систем ЭАЗ

Наладка систем является обязательным условием создания энергоэффективного режима работы систем, обеспечивающих комфортные параметры эксплуатации ЭАЗ. Проводятся комплексные измерения режимных параметров систем и параметров комфорта. Измерения могут выполняться в любой период сезона с дальнейшим преобразованием результатов к безразмерному виду [2]. Принятый метод выявления характеристических величин аналогичен [12].

Для оценки теплового комфорта результаты измерений представляются в виде полей безразмерных температур $\Theta_{в.п.}$, рассчитываемых по выражению

$$\Theta_{в.п.} = (t_{в.} - t_{в.п.}) / \Delta t_{н.} \quad (6)$$

При значениях $\Theta_{в.п.} < 1$ условия комфорта соблюдаются, а при $\Theta_{в.п.} > 1$ можно говорить о нарушении теплового комфорта и степени отклонения действительных температурных перепадов от нормируемого.

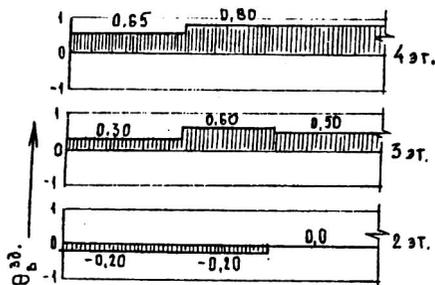
Воздушно-тепловой режим помещения оценивается комплексом параметров микроклимата.

Воздухообмен при гравитационной вентиляции помещений нормируется для $t_{н.} = 5^{\circ}\text{C}$. Натурные температурные параметры всегда отличаются от нормируемых, поэтому измеренный воздухообмен $L_{т.изм.}$, м³/ч приводится к нормируемым температурным условиям по выражению

$$L_{50^{\circ}\text{C} изм.} = L_{т.изм.} \cdot \sqrt{k_4} \quad (7)$$

Несбалансированность режима работы системы отопления здания создаёт температурную неравномерность между отдельными помещениями. Для анализа этой неравномерности используются безразмерные преобразования результатов измерений в виде

$$\Theta_{в.зд.} = (t_{в.пом.} - t_{в.ср.зд.}) / \Delta t_{max}; \quad \Delta t_{max} = \max[|t_{в.пом.} - t_{в.ср.зд.}|], \quad (8)$$



Температурная равномерность оценивается условием $\Theta_{в.зд.} \rightarrow \pm 0$. На рис.8 приведен фрагмент распределения значений безразмерной температуры $\Theta_{в.зд.}$ для многоэтажного дома.

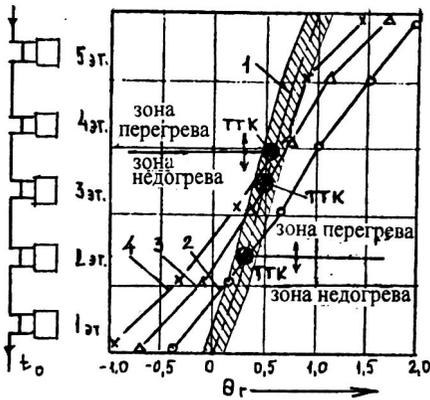
Рис.8. Фрагмент распределения безразмерной температуры $\Theta_{в.зд.}$ для многоэтажного дома

Устойчивость режима работы отопления определяется тепло-гидравлической сбалансированностью отдельных веток (стояков и приборов)

системы отопления между собой. Реальные причины выявляются путём раздельного анализа температурного и гидравлического режимов работы.

При тепловом обследовании предусматривается измерение температуры теплоносителя $t_{т.изм.}$, °С, по стояку (или по ветке), которая приводится к безразмерной температуре теплоносителя Θ_t по формуле

$$\Theta_t = (t_{т.изм.} - t_{о.ЦКР}) / (t_{г.ЦКР} - t_{о.ЦКР}), \quad (9)$$



Результаты обработки измерений представляются в графическом виде (рис.9).

Рис.9. Пример распределения безразмерной температуры теплоносителя Θ_t по длине стояка (5-эт. жилой дом). 1 - зона проектного стояка; 2, 3, 4 - измерения соответственно для стояка в центральной, средней и торцевой части здания

Зона 1 (рис.9) соответствует проектному местоположению значений Θ_t для всех стояков системы. Кривые 1, 2 и 3 отражают реальный температурный режим стояков.

Точку пересечения проектной и действительной зависимости можно обозначить "точкой теплового комфорта" (ТТК). Вышерасположенная от неё зона может именоваться "зоной перегрева", а расположенная ниже - "зоной недогрева" помещений.

Обозначения

$Q_{с.ми}$ - поступления от солнечной энергии через окна южного фасада за месяц, МДж;
 $Q_{ст. i}$ - сумма радиации за месяц на вертикальную стену южной ориентации, МДж/м²;
 η_2 - коэффициент пропускания солнечного излучения через остекление оконных проёмов; k_1, k_2 - коэффициенты соответственно запылённости остекления и затенённости от переплёттов; $k_{з1}$ - коэффициент, учитывающий влияние солнцезащитных устройств (рассчитывается для каждого месяца); A_o - общая площадь остекления южного фасада, м²; η - КПД гелиоколлектора, рассчитываемый как $\eta = Q_{us} / (G_k * A)$; Q_{us} - полезная теплота, получаемая гелиоколлектором, Вт; A - площадь гелиоколлектора, м²; G_k - солнечное излучение на поверхность гелиоколлектора, Вт/м²; ΔT_a - разность температур, °С, рассчитываемая как $\Delta T_a = T_m - T_a$; $T_m = (T'_m - T''_m) / 2$; ΔT_m - разность температур, °С, рассчитываемая как $\Delta T_m = T''_m - T'_m$; T'_m - температура теплоносителя на входе в гелиоколлектор, °С; T''_m - температура теплоносителя на выходе из гелиоколлектора, °С; T_a - температура окружающей среды вокруг гелиоколлектора, °С; g - гравитационная постоянная 9,81 м²/с; h - уровень аккумулятора над гелиоколлектором ($h = H_o - H_g$), м; ν - вязкость теплоносителя, м²/с; S - характеристика гидравлического сопротивления гелиосистемы, Па*с²/кг², рассчитываемая как $S = \Delta P / M^2$; a, b, d, n - экспериментальные константы; Q_t, Q_n - соответственно суммарные трансмиссионные теплотери здания и теплотери

вследствие воздухообмена, Вт; $Q_6=150 \cdot A_n/f_n$ - бытовые теплопоступления, Вт; A_n - площадь пола жилых помещений, м², f_n - средняя величина жилой площади на 1 человека, м²/чел.; η_1 - коэффициент, принимаемый в зависимости от способа регулирования системы отопления; t_b , t_n - расчётная температура соответственно внутреннего и наружного воздуха (параметры Б); t_{mi} - среднемесячная температура; $t_{в.п}$ - температура внутренней поверхности ограждения, °С; Δt_n - нормируемый температурный перепад, °С; k_4 - коэффициент, принимаемый в зависимости от значений измеренных и нормируемых температур внутреннего и наружного воздуха; $t_{в.пом.}$, $t_{в.пом.}$, $t_{в.ср}$ - температура соответственно в данном помещении, в i -м помещении, средняя по помещениям здания, °С; $t_{г.ЦКР}$, $t_{о.ЦКР}$ - температура теплоносителя соответственно в подающей и обратной магистралях согласно графику ЦКР при t_n на момент обследования.

Литература

1. Богословский В.Н., Покотиллов В.В. Системы микроклимата экспериментального многоквартирного жилого дома с эффективным использованием энергии (проект для г.Москвы)// Четвёртая науч.-практ. конф. "Проблемы строительной теплофизики систем микроклимата и энергосбережения в зданиях". М.: РААСН, НИИСФ, 1999. С.37-47.
2. Покотиллов В.В., Макаревич С.А. Оценка теплотехнического состояния наружных ограждений и систем микроклимата зданий с использованием безразмерных преобразований результатов обследования // Там же. С.81-88.
3. Покотиллов В.В., Осененко А.В. Энергоэффективная ячейка жилой городской застройки для климата Витебска // Архитектура и строительство. 1999. №3. С.25-26.
4. Климат Беларуси / Под ред. В.Ф.Логинова. Минск: Институт геологических наук АН Беларуси, 1996. 234 с.
5. Р.Авезов, М.Барский-Зорин, И.Васильева и др. Системы солнечного тепло- и хладоснабжения / Под ред. Э.Сарнацкого и С.Чистовича. М.: Стройиздат, 1990. 328с.
6. С.Терной, Л.Бекл и др. Проектирование энергоэкономичных общественных зданий / Пер. с англ. А.С.Гусева. Под ред. В.П.Титова. М.: Стройиздат, 1990. 336с.
7. Othmar Humm. Niedrigenergiehauser in Theorie und Praxis. 226 S.m.v. Abb., 1990.
8. V.V.Pokotilov, S.A.Makarevich, S.A.Zenhanka. Heliosystems and bioclimatic architecture for Belarus condition // CISBAT' 99. Conference Internationale Energie Solaire et Batiment. Lausanne 22-23 septembre 1999, EPFL, Batiment LESO, P.283-287.
9. Покотиллов В.В., Шалак А.Д., Макаревич С.А. Теплообмен в гелиосистеме с естественной и насосной циркуляцией жидкости // Теплообмен - ММФ-96. Теплообмен в энергетических устройствах и энергосбережение. Минск: АНК «ИТМО им. А.В.Лыкова» АНБ, 1996. Т.Х. Ч.1. С.133-136.
10. МГСН 2.01-94.
11. S.Zenhanka, V.Pokotilov (Belarus), Tomas Kopf (Austria). First results of solar thermal equipment produced by "Doma" in International Sakharov Institute of Radioecology // World sustainable energy day. Rroceedings, 4.-5.3.1999, Wels/ Austria, P.170.
12. Мачинский В.Д. Метод характеристических величин в строительной теплотехнике. М.-Л.: Стройиздат, 1950. 87 С.